

地図ベースの自動運転シャトルバスの衝突防止のための操舵角制限制御に関する研究

西村 駿^{*1} 大前 学^{*1}

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科^{*1}

自動運転の実証実験において、測位・自己位置推定の失陥等を原因とする車線逸脱、路側構造物との衝突事故が報告されている。本研究では、地図ベースの自動運転シャトルバスの安全性向上を目的に、見通しの良い制御で衝突防止を保証する手法を提案し、実車実験によりその有効性を明らかにした。提案手法では、自動運転制御により算出された目標操舵角を監視し、障害物と衝突する危険性がある場合にはアクチュエータに指令する前に目標操舵角の制限を行う。これにより、実車実験の結果、障害物と衝突する危険性のある目標操舵角には制限をかけ衝突を防止し、正常な自動運転による経路追従走行時には過剰な制限がかからないことを確認した。

Limiting Control for Collision Avoidance for Map-based Automated Shuttlebus

Shun Nishimura^{*1} Manabu Omac^{*1}

Keio University Graduate School of Media and Governance^{*1}

In automated car experiments, there have been reports of lane departures and collisions with roadside structures caused by failures in positioning and localization. In this research, aiming at improving the safety of map-based automated shuttlebus, we proposed a method to guarantee anti-collision with good visibility control, and clarified its effectiveness through actual vehicle experiments. In the proposed method, the target steering angle calculated by the automated driving control is monitored, and if there is a danger of colliding with obstacles, the target steering angle is limited before commanding the actuator. As a result, it was confirmed that the target steering angle, which is at risk of colliding with obstacles, is limited to prevent collisions, and that the proposed method does not impose excessive limitation during safe automated driving.

Keyword: Automated Driving, Collision Avoidance, Lateral Control

1. はじめに

本研究では、測位・自己位置推定の失陥等を原因とする誤操舵を防止するための見通しの良い制御手法を、地図ベースの自動運転シャトルバスを用いた実車実験によって、適切に衝突を防止しながらも正常な自動運転制御に干渉しないか検証した結果について報告する。

現在、国内でのバス事業者における運転手不足が社会的課題の1つとして存在する。国土交通省の報告では、自動車運転の職業について、有効求人倍率が全職業の2倍以上であり、特にバス運転手の平均年齢は全職種と比較して7.7歳ほど高くなっている[1]。今後、生産年齢人口の減少が継続することでバ

ス事業者での運転手不足がさらに深刻化する懸念がある。これは路線バスの減便・廃止にもつながっており、地域の移動手段確保に影響が出ているのが現状である[2]。

バスの運転手不足の課題を解決するための手法の1つとして、自動運転技術が注目されており、現在では自動運転によるバスの移動サービスの実証実験が行われるようになってきている[3]。将来的にバスなどを自動運転で運行できるようになれば、運転手を無人にすることが可能になり、運転手不足の解決につながることを期待される。一方で、こうした実証実験が行われていく中で、自動運転を行う車両が走路を逸脱し、路側構造物と衝突する事故が報告されてい

る[4]-[6]. 事故の多くは、測位・自己位置推定の失陥による不適切な操舵を原因とするものであり、自動運転の衝突防止を保証することが求められている。

自動運転に用いられる操舵制御手法の1つとして、RTK-GNSSの測位、LiDARによる高精度地図の照合処理を用いた自己位置の計測・推定によって目標パスとの位置関係を算出し目標操舵角を決定する手法がある[7][8]. 本論文では、この手法を「地図ベースの自動運転」と呼ぶ。この手法は、目標パスの情報を変更することによって容易に走路の変更ができる利点がある。一方で、前述した測位・自己位置推定手法により得られた自己位置情報は、走行環境の状態によって精度が変化し、誤差が大きくなれば正しい操舵制御が行えなくなる。特に、シャトルバスのような旅客輸送を行う自動車は、全幅が普通乗用車と比べ大きいため、誤差によっては路側構造物と衝突する危険性は高くなる。そこで、筆者らは、この自己位置計測・推定によらず、衝突を防止する制御が必要であると考え、ここでいう衝突とは、ハンドルが不適切な方向に操舵されることにより、縁石や電柱などの路側構造物と衝突することを指す。

以上の背景を踏まえ、本研究では、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスで運行している地図ベースの自動運転シャトルバスを対象に、見通しの良い制御で衝突防止を保証する手法を提案する。具体的には、自動運転制御（上位制御）で算出された目標操舵角を監視し、衝突の可能性がある場合に、アクチュエータに指令される前段で制限をかける操舵角制限制御を提案する。提案する制御では、RTK-GNSSの測位、LiDARによる高精度地図の照合処理を用いた自己位置の計測・推定による自己位置の情報を用いずに衝突の可能性を判定する。この制御は、自動運転制御の下位に配置されるため、上位の自動運転制御を複雑化することなく、衝突防止が実現できる。また、自動運転シャトルバスのセーフティドライバーが行う監視・介入作業と同等の役割を果たす。

本論文の構成は以下のようになっている。第2章では、本研究で構築した制御の適用対象である地図ベースの自動運転シャトルバスの概要について述べる。第3章では、提案する操舵角制限制御において、衝突を防止するための手法を述べる。第4章では、地図ベースの自動運転シャトルバスを用いた実車実験により、提案手法の効果を評価した結果を報告する。第5章では結論を述べる。

2. 地図ベースの自動運転シャトルバスの概要

本研究で構築した制御の適用対象である地図ベースの自動運転シャトルバスの概要について述べる。

この自動運転シャトルバスは、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス構内と公道を含めた1周約2.2kmの区間(図1)をセーフティドライバーによる監視・安全確保のもと自動運転(レベル2相当)で走行するシャトルバスである。2022年5月より、神奈川中央交通への運行委託のもと大学関係者を輸送対象として、自動運転での定時運行を開始している。2022年10月時点では、最高速度は20km/hにて1日9便を自動運転により運行している。

自動運転シャトルバスは、三菱ふそうトラック・バス製のローザを改造した車両であり、26人乗りである。図2に示すように、車体天井部には5つのLiDAR(前方・側方監視用)と2つのカメラ、2つのGNSSアンテナが搭載されている。この自動運転シャトルバスは、RTK-GNSSの測位、LiDARによる高精度地図の照合処理を用いた自己位置の計測・推定結果をもとに、事前に用意した目標パス上を追従走行する地図ベース型の自動運転を行う。車速・操舵の制御は、図3に示すソフトウェアから算出された目標車速・操舵角の情報を、マイコンを経由して図4に示す外付けアクチュエータに指令値として送ることで行われる。

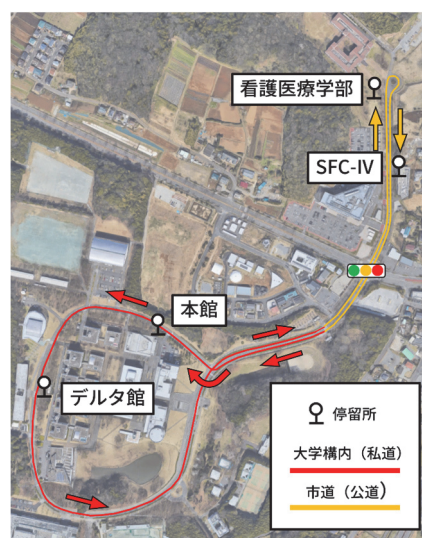


図1 運行ルート(引用元: Google Map)

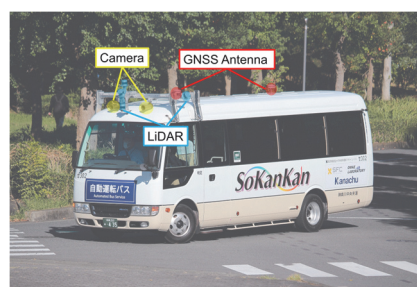


図2 地図ベースの自動運転シャトルバス



図3 ソフトウェア実行画面

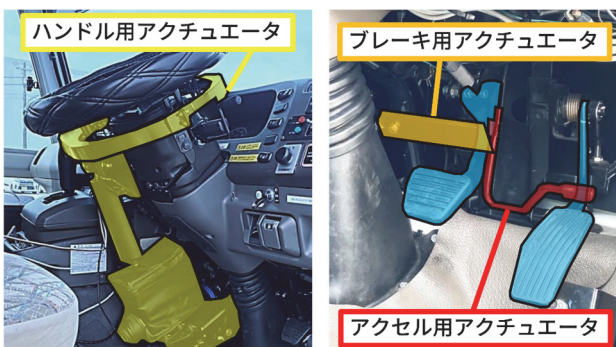


図4 外付けアクチュエータ

3. 操舵角制限制御の構築

この章では、本研究で提案する衝突防止の手法と操舵角制限制御における障害物情報の取得手法、衝突防止操舵角範囲の計算手法について述べる。

3-1 地図ベースの自動運転シャトルバスにおける衝突防止の手法

本研究で用いた地図ベースの自動運転シャトルバスの自動運転制御の構成について述べる。この自動運転制御では、RTK-GNSSによる測位、およびLiDARによる高精度地図の照合処理を用いて自己位置を計測・推定する。次に、位置情報として格納あるいは生成された目標パスとの相対位置関係を求め、目標パス上を走行するように目標操舵角を決定する。本研究で提案する操舵角制限制御を導入しない場合、この目標操舵角がアクチュエータに指令値として送られる。もし、自己位置推定が正しく行われなかった場合、目標パスとの相対位置も間違った値となるため、車両周囲の構造物と衝突する危険がある目標操舵角がアクチュエータに送られる可能性がある。

本研究では、図5に示すように衝突防止のための操舵角制限制御を自動運転制御の下位に配置し、自動運転制御で算出された目標操舵角をアクチュエータに送る前に、必要に応じて制限する手法を提案する。

提案する操舵角制限制御は、自動運転制御の自己位置推定情報を用いずに、周囲の障害物との衝突可能性を判定し、衝突防止を実現する操舵角を算出する。自動運転制御から送られた目標操舵角が、衝突防止操舵角の範囲内にあるかを監視し、超過時には制限した値をアクチュエータに送る。

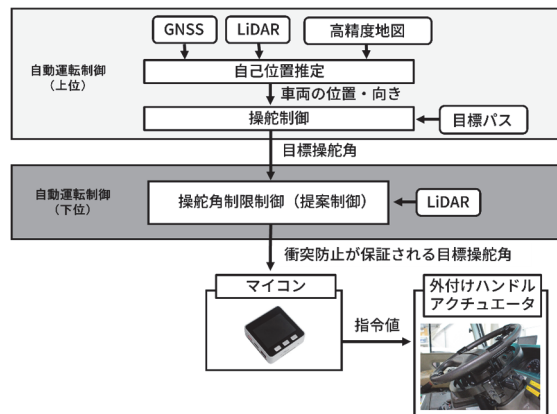


図5 地図ベースの自動運転シャトルバスの操舵制御の構造

3-2 障害物情報の取得手法

衝突防止操舵角を算出するために必要な障害物情報の取得手法について述べる。本研究では、図6に示すように自動運転シャトルバスの前方天井部に取り付けられた4つ(実験当時)のLiDARにより障害物を検出する。このうち3つのLiDARは、車両近傍の障害物を検出するために、下方向へ角度を付け設置している。

本研究では、車両を中心とした100m×100mの領域を、1辺0.2mの格子に分割し、各格子に各LiDARで計測された点群を格納する。各格子において格納された点群の高さの差が0.1m以上の格子を障害物として判定し、それ以外を路面として扱う。以上の手法により、車両から見た障害物の格子状における相対位置を算出し、障害物情報として取り扱う。

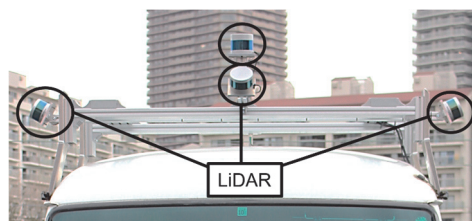


図6 自動運転シャトルバスのLiDAR

3-3 衝突防止操舵角範囲の計算

衝突防止のための操舵角範囲計算手法について述べる。本研究では、自動運転シャトルバスの車両将

来軌跡を車体各部位別に求め、一定操舵角で走行した場合の障害物と車両将来軌跡との位置関係を算出する。以上の情報から、衝突防止の条件を満たす操舵角の範囲を明らかにし、衝突防止操舵角の制限値とする。

以下に具体的な制限値の探索手法について述べる。本研究では、車両の旋回中心が、後輪軸中心の横方向にあると仮定し、旋回半径 r [m] (旋回中心から後輪軸間中心までの距離)を以下の式で求めた。 l [m]は車輪軸間距離、 δ [rad]はタイヤの操舵角、 K は調整用のパラメータであり、 K については実走行の旋回半径を計測し調整した。

$$r = \frac{K \cdot l}{\delta} \dots \dots \dots (1)$$

この旋回半径 r を基準に、障害物と車両将来軌跡の重なりを判定する上で必要な3つの旋回半径(図7に示す r_1 , r_2 , r_3)も算出する。

r , r_1 , r_2 , r_3 をもとに、衝突防止操舵角の制限値を探索していく。探索手順として、左側の制限値を算出する場合を例に述べる。まず、操舵角 α [deg]から左方向へ β [deg] (本研究では $\alpha=10$, $\beta=90$ としている)まで、一定刻み (本研究では20とする)ごとに r_2 と r_3 を計算する。さらに、旋回中心位置から計測したすべての障害物までの距離を計算する。それにより、車両将来軌跡と障害物の重なりを判定が可能になる。なお、図8(左)に示すように、車両前部を境界に前後の位置によって、重なりを判定するための基準となる旋回半径を変えている。エリアAの障害物は r_2 と重なるものまでの衝突余裕時間 (t_1)、エリアBの障害物に対しては r_3 と重なるものまでの距離

(l)をそれぞれ計算し、最も短い衝突余裕時間・距離の障害物を特定する。制限値を決定する条件として、特定した障害物の衝突余裕時間・距離が一定範囲内であった場合はその時の操舵角を制限値とする。もしこの探索段階で制限値 α [deg]、つまり状況として左側への安全な操舵角が無くなり、右側への操舵が必要な場合は右側の操舵角領域で制限値の探索を行う。手順としては図8(右)に示すように操舵角 β [deg]から左方向へ一定刻み (本研究では20とする)ごとに r_1 を計算する。さらに、旋回中心位置から計測したすべての障害物までの距離を計算する。それにより、左側の制限値を算出する手法と同様に右側の領域で制限値を算出する。なお、この場合は図8(右)に示すように車両から見て旋回半径 r_1 と重なる障害物までの最も短い衝突余裕時間 (t_2) が一定範

围内となった操舵角を制限値とする。

以上の手順から左右の衝突防止操舵角の制限値を求めることで、衝突防止操舵角の範囲が決定できる。自動運転制御で算出された目標操舵角がこの範囲の中にあるか監視、超過する場合は範囲内に制限する処理をアクチュエータに送る前段に入れることで、衝突防止を保証するための制御として機能させる。

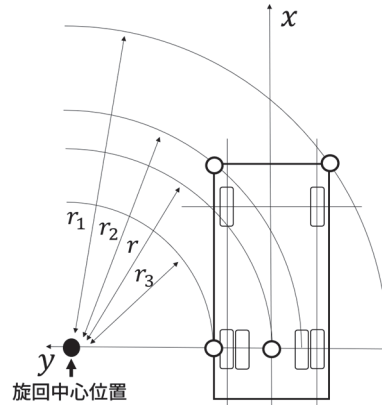


図7 車体各部位別の旋回半径

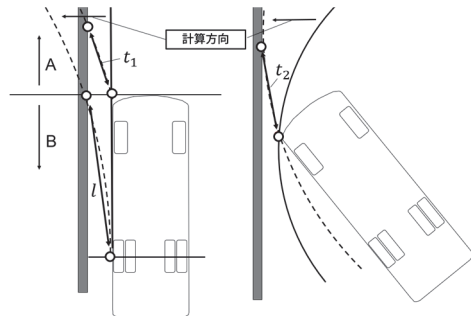


図8 車両将来軌跡と障害物の位置関係

4. 評価

この章では、第3章で説明した衝突防止のための操舵角制限制御の実車実験による評価結果を述べる。以下の各節では、評価手法、評価結果について述べる。

4-1 評価手法

実験に用いた地図ベースの自動運転シャトルバスの操舵制御を、図5に示す操舵角制限制御を含めた制御により、アクチュエータに指令値として送る目標操舵角を決定する構成とした。この操舵制御で、障害物の存在する指定のコースを走行させ、その時の衝突防止操舵角の制限値を評価対象とした。実験は周回走行が可能な大学構内駐車場で実施した。

実験は、3種類の走行コースにて行った。これらを以下では、実験A、実験B、実験Cと呼ぶ。実験Aでは、車両左側に障害物を配置し、速度5km/hで左折

する形で手動運転にて走行した。図 9 (左) に走行コースを示す。この実験では、自動運転制御の代わりに手動で目標操舵角を発生させる。その際、意図的に後輪の通過軌跡の内側に障害物を巻き込ませるように左方向へ過剰に操舵を切ることによって走行コースの逸脱再現とする。

実験 B では、車両左側に障害物が連続的に存在する直線区間を、速度 5km/h で手動運転にて走行した。図 9 (右) に走行コースを示す。この実験でも実験 A と同様に自動運転制御の代わりに手動で目標操舵角を発生させる。その際、直進中意図的に左方向へ操舵を切り走行コースの逸脱再現とする。実験 A, 実験 B での評価目的は、操舵角制限制御が制限値によって適切に目標操舵角に制限をかけ、障害物との衝突防止が可能か検証することである。

実験 C では、自動運転制御と操舵角制限制御により事前に設定した目標パスの追従走行を行った。図 10 に走行コースを示す。この際、直線では速度 20km/h, 旋回区間では速度 5km/h で走行し、RTK-GNSS による高精度な自己位置計測が行えている状態で経路追従走行を行う。実験 C での評価目的は、正常な自動運転制御による経路追従走行において、操舵制御構成の下位に操舵角制限制御を通した場合でも目標操舵角に対し過剰な制限なしで走行を継続できるか検証することである。

4-2 評価結果

図 11-12 に実験 A の結果を示す。図 11 は目標操舵角と制限値であり、図 12 は車両軌跡である。実験 A では、障害物を車両前方部が通過した際に後輪の通過軌跡の内側に障害物を巻き込む目標操舵角を発生させ続けた。制限値の結果において、検出した障害物と車両将来軌跡との位置関係から目標操舵角に対し左側の制限値で制限をかけ、過剰に操舵角を左方向（障害物方向）へ切らない様子がわかる。車両軌跡においては、後輪の軌跡が障害物と接触することなく通過でき、適切に制限値による制限が行えているといえる。

図 13-14 に実験 B の結果を示す。図 13 は目標操舵角と制限値であり、図 14 は車両軌跡である。実験 B では、直進中左方向の障害物に対し接近するように目標操舵角を与えた。この場合の制限値は、検出した左側の障害物の位置関係から目標操舵角に右方向へ操舵を回避させる制限値が算出されている様子がわかる。車両軌跡においては、車体左前方部が障害物と接触することなく走行を継続でき、適切に制限値による制限が行えているといえる。

図 15 に実験 C の結果を示す。図 15 は、目標操舵角と制限値であり、図中に記載された①～④は、図 10 の走行コースに記載された旋回区間①～④に対応している。実験 C では、大きな操舵入力が発生し

ている 4 つの旋回区間と操舵がほぼ中立となっている直線区間双方において過剰な制限値による制限無しに走行が行えていることを確認した。なお旋回区間②の制限値の結果において、目標操舵角が制限値と同時に変化している部分があるが、これは制限値に起因する目標操舵角の変化ではないことを確認している。

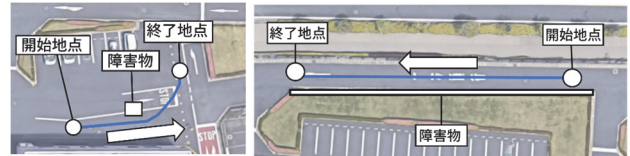


図 9 走行コース (左: 実験 A, 右: 実験 B) (引用元: Google Map)

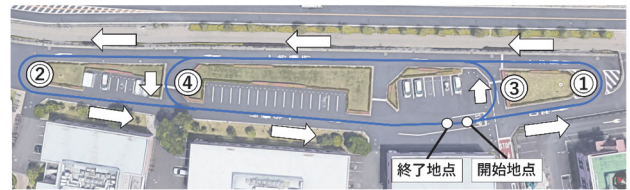


図 10 走行コース (実験 C) (引用元: Google Map)

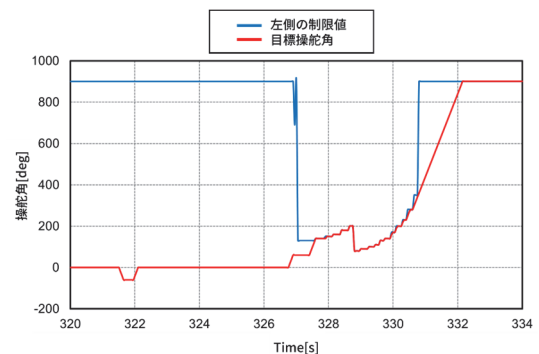


図 11 実験結果 (実験 A の目標操舵角と制限値)

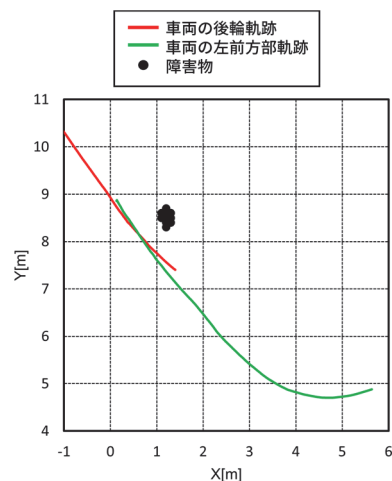


図 12 実験結果 (実験 A の車両軌跡)

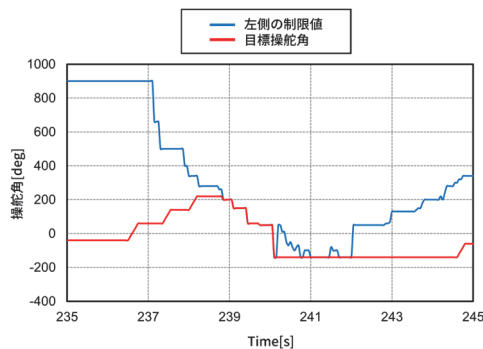


図 13 実験結果（実験 B の目標操舵角と制限値）

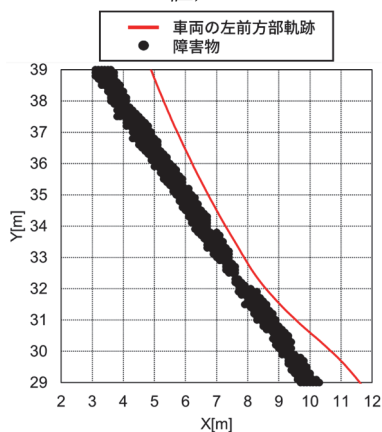


図 14 実験結果（実験 B の車両軌跡）

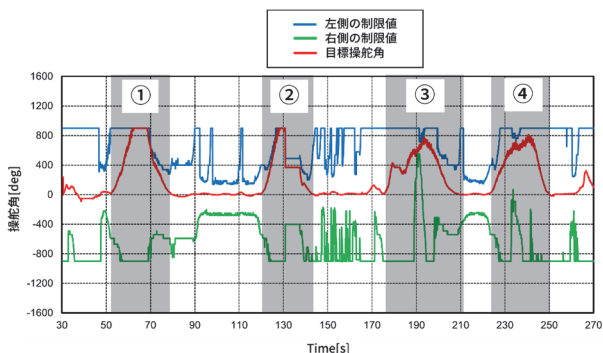


図 15 実験結果（実験 C の目標操舵角と制限値）

5. 結論

本研究では、地図ベースの自動運転シャトルバスにおいて、見通しの良い制御で衝突防止を保證する手法を提案し、実車実験によりその有効性を明らかにした。自動運転制御の下位に衝突防止のための制御を置き、アクチュエータへの指令値を制限する手法により、自動運転制御を複雑化することなく、衝突防止を実現できる。本研究では、この制御構造で、衝突防止のための操舵角の制限値算出方法を提案した。実車実験により評価を行い、提案する手法により、路側障害物に衝突する目標操舵角を適切に

制限して衝突防止が実現できることを確認した。さらに、自動運転制御による走行時は、曲率が大きい旋回路を含むコースでも、自動運転制御と干渉しないことを確認した。

参考文献

- [1] 国土交通省, 自動車運転者の働き方の現状, 2017, (閲覧日 2021 年 12 月 20 日). <https://jsite.mhlw.go.jp/miyagi-roudoukyoku/var/rev0/0119/7589/jidousha1.pdf>
- [2] 国土交通省, 中国地方における「自動車運送事業(バス・タクシー)の運転手不足対策」に関する調査, 2019, (閲覧日 2021 年 12 月 20 日). <https://www.tb.mlit.go.jp/chugoku/content/00095750.pdf>
- [3] 国土交通省, 基幹的なバスにおける自動運転導入に関する検討 中間とりまとめ, 2022, (閲覧日 2022 年 10 月 27 日). <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001475302.pdf>
- [4] 名古屋大学低速自動運転車両事故検証委員会, 低速自動運転車両事故報告書, 2019, (閲覧日 2021 年 12 月 20 日). https://www.nagoya-u.ac.jp/info/upload_images/20191206_report.pdf
- [5] 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 中型自動運転バスによる実証実験(大津市:京阪バス)における柵の支柱との接触事案について, 2020, (閲覧日 2021 年 12 月 20 日). https://www.aist.go.jp/aist_j/news/announcement/au20200831.html
- [6] 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 中型自動運転バスによる実証実験(日立市)におけるガードレールとの接触事案の原因調査結果と対策について, 2020, (閲覧日 2021 年 12 月 20 日). https://www.aist.go.jp/aist_j/news/announcement/au20201225.html
- [7] 津川定之, “自動運転技術の発展”, 国際交通安全学会, Vol. 40, No. 2, pp. 7-13, 2015.
- [8] 菅沼直樹, 米陀佳祐, “自動車の自動運転におけるデジタル地図の活用”, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 10, pp. 760-765, 2015.